

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Petar Vitić

Zagreb, 2016. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ANALIZA STABILNOSTI MJERITELJSKIH
ZNAČAJKI DRŽAVNOG ETALONA ZA
HRAPAVOST RH PERTHEN**

Završni rad

Mentor:

Doc. Dr. sc. Gorana Baršić

Student:

Petar Vitić

Zagreb, 2016. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici doc.dr.sc. Gorani Baršić na pomoći tijekom pisanja rada.

Petar Vitić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

PETAR VITIĆ

Mat. br.: 0035186596

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Analiza stabilnosti mjeriteljskih značajki Državnog etalona za
hrapavost RH Perthen**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Analysis of the stability of metrological characteristics for Croatian
national roughness standard Perthen**

Opis zadatka:

1. Opisati sustav rada Nacionalnog laboratorija za duljinu na području ispitivanja teksture površina.
2. Detaljno opisati etalone hrapavosti za umjeravanje elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom propisane normom *ISO 5436-1:2000 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method; Measurement standards -- Part 1: Material measures*.
3. Provesti analizu stabilnosti mjeriteljskih značajki Državnog etalona za hrapavost RH Perthen temeljem rezultata redovitih umjeravanja etalona od strane nacionalnih mjeriteljskih instituta.
4. Temeljem rezultata provedene analize donijeti zaključak o stabilnosti mjeriteljskih značajki Državnog etalona za hrapavost RH Perthen.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Gorana Baršić

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Sadržaj

Popis slika	III
Popis tablica	V
Popis oznaka.....	VI
1. Nacionalni laboratorij za duljinu RH	7
1.1 Osiguranje sljedivosti	8
1.2 Etaloni hrapavosti	10
2. Mjerni uređaji s ticalom	14
2.1 Uređaji za ispitivanje hrapavosti	16
2.2 Pogreške koje se javljaju kod mjerenja	17
3. Parametri hrapavosti.....	21
3.1 Filtriranje površine	22
3.2 2D parametri hrapavosti	24
3.2.1 Amplitudni parametri	24
3.2.2 Uzdužni parametri	27
3.2.3 Hibridni parametri	28
3.2.4 Krivulje i srodni parametri.....	28
4. Etaloni za umjeravanje uređaja s ticalom za ispitivanje hrapavosti površine	31
4.1 Tip A — etalon dubine brazde	31
4.2 Tip B — etalon provjere stanja igle ticala	32
4.3 Tip C — etalon valovitosti	33
4.4 Tip D — etalon hrapavosti	35
4.5 Tip E — etalon profila koordinata.....	37
5. Proračun stabilnosti državnog etalona za hrapavost Perthen	38
5.1 Vizualna kontrola stanja mjerne površine	39
5.2 Analiza stabilnosti parametara hrapavosti	40
5.2.1 Rezultati analize s referentnom vrijednosti kao težinskom aritmetičkom sredinom....	42

6. Zaključak	47
7. Literatura	49

Popis slika

<i>Slika 1. Osiguravanje sljedivosti za hrapavost u HMI/FSB-LPMD-u</i>	<i>9</i>
<i>Slika 2. Mjerna površina</i>	<i>10</i>
<i>Slika 3. Mjerna površina s 3 široke brazde</i>	<i>11</i>
<i>Slika 4. Mjerna površina sa slijedom pravokutnih brazdi</i>	<i>11</i>
<i>Slika 5. Etalon hrapavosti perthen</i>	<i>12</i>
<i>Slika 6. Veličina mjerne površine i geometrija etalona hrapavosti Perthen</i>	<i>12</i>
<i>Slika 7. Konstrukcija mjernog uređaja sa ticalom</i>	<i>14</i>
<i>Slika 8. Metode mjerenja 3D uređaja s ticalom</i>	<i>15</i>
<i>Slika 9. Perthometer S8P</i>	<i>16</i>
<i>Slika 10. Utjecaj radijusa igle ticala na snimljeni profil</i>	<i>18</i>
<i>Slika 11. Vanjsko vođenje.....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 12. Vođenje s nožicom</i>	<i>18</i>
<i>Slika 13. Ovisnost načina vođenja igle ticala o izgledu profila</i>	<i>19</i>
<i>Slika 14. Greška zbog utjecaja nožice</i>	<i>19</i>
<i>Slika 15. Duljina ispitivanja, duljina vrednovanja i referentna duljina</i>	<i>21</i>
<i>Slika 16. Odstupanje na stvarnom profilu.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 17. Prijenosne karakteristike profila hrapavosti.....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 18. Parametri R_p, R_v i R_z na referentnoj duljini l_r.....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 19. Ukupna visina profila R_t</i>	<i>25</i>
<i>Slika 20. Srednje aritmetičko odstupanje R_a</i>	<i>26</i>
<i>Slika 21. Srednji korak elemenata profila R_{sm}</i>	<i>27</i>
<i>Slika 22. Srednji kvadratni nagib profila $R_{\Delta q}$</i>	<i>28</i>
<i>Slika 23. Udio materijala u profilu $R_{mr}(c)$</i>	<i>29</i>
<i>Slika 24. Abbot – Firestone krivulja udjela materijala profila</i>	<i>29</i>
<i>Slika 25. Parametri hrapavosti: krivulja udjela materijala</i>	<i>30</i>
<i>Slika 26. Tip A1</i>	<i>32</i>
<i>Slika 27. Tip A2</i>	<i>32</i>
<i>Slika 28. Tip B2</i>	<i>33</i>
<i>Slika 29. Tip B2</i>	<i>33</i>
<i>Slika 30. Tip C1</i>	<i>34</i>
<i>Slika 31. Tip C2</i>	<i>34</i>

<i>Slika 32. Tip C3</i>	<i>34</i>
<i>Slika 33. Tip C4</i>	<i>35</i>
<i>Slika 34. Tip D1</i>	<i>36</i>
<i>Slika 35. Tip D2</i>	<i>36</i>
<i>Slika 36. Tip E2</i>	<i>37</i>
<i>Slika 37. Referentni državni etalon za hrapavost Perthen</i>	<i>38</i>
<i>Slika 38. Mjerna površina pod uvećanjem 100x</i>	<i>39</i>
<i>Slika 39. Mjerna površina pod uvećanjem 200x</i>	<i>40</i>
<i>Slika 40. Usporedba rezultata mjerenja parametra hrapavosti Ra</i>	<i>44</i>
<i>Slika 41. Usporedba rezultata mjerenja parametra hrapavosti Rz.....</i>	<i>45</i>

Popis tablica

Tablica 1. Osnovni podaci o uređaju Perthometer S8P	17
Tablica 2. Tipovi i nazivi etalona za umjeravanje	31
Tablica 3. Nazivne vrijednosti parametara hrapavosti na etalonu Perthen	38
Tablica 4. Rezultati mjerenja parametara hrapavosti po godinama	40
Tablica 5. Rezultati mjerenja parametra R_a po godinama	43
Tablica 6. Rezultati proračuna za parametar R_a	44
Tablica 7. Rezultati mjerenja parametra R_z po godinama	45
Tablica 8. Rezultati proračuna za parametar R_z	46
Tablica 9. Standardna odstupanja za parametre R_a i R_z	46

Popis oznaka

U	μm	standardna mjerna nesigurnost
U	μm	proširena mjerna nesigurnost
L_r	mm	duljina ispitivanja
L_t	mm	duljina vrednovanja
l_r	mm	referentna duljina
R_z	μm	najveća visina profila
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje ordinate $Z(x)$
RS_m	μm	srednji korak elementa profila
d	μm	dubina brazde
P_t	μm	ukupna visina profila
r	mm	radius vrha igle ticala
R_p	μm	najveća visina vrha profila
R_v	μm	najveća dubina dola profila
R_q	μm	kvadratno odstupanje unutar vrha profila
$R_{\Delta q}$	μm	srednji kvadratni nagib profila
R_{pk}	μm	reducirana visina vrha profila
R_k	μm	dubina jezgre hrapavosti profila
k		faktor pokrivanja
λ_s	mm	sjecište između hrapavosti i kraćih valnih duljina
λ_c	mm	sjecište između hrapavosti i valovitosti
λ_f	mm	sjecište između valovitosti i duljih valnih duljina
P		vjerojatnost
x_{lab}	μm	rezultati mjerenja laboratorija
$u(x_{lab})$	μm	mjerna nesigurnost laboratorija
x_{ref}	μm	referentna vrijednost
$u(x_{ref})$	μm	mjerna nesigurnost referentne vrijednosti
u_{int}	μm	unutarnja mjerna nesigurnost
u_{ext}	μm	vanjska mjerna nesigurnost
s		standardno odstupanje

1. Nacionalni laboratorij za duljinu RH

Nacionalni laboratorij za duljinu HMI/FSB-LPMD Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu nalazi se u niskom prizemlju sjeverne zgrade Fakulteta strojarstva i brodogradnje i ima površinu od 350 m². Utemeljio ga je prof. dr. sc. Ivo Hercigonja 1959. godine. Od osnutka laboratorija u njemu se mjere duljina, kut i hrapavost s visokom točnošću.[1]

Mjerenje duljine

Korištenjem garniture plan paralelnih graničnih mjera proizvođača Mahr i primjenom usporedne metode mjerenja danas se mjerenje etalona duljine od 0,5 mm do 100 mm ostvaruje na razini mjernih nesigurnosti od $(0,5 + 1,1 L) \mu\text{m}$, L u m.

Mjerenje kuta

Mjerne nesigurnosti koje HMI/FSB-LPMD postiže su na razini od 1" što udovoljava današnjim zahtjevima hrvatskog gospodarstva. Glavno ograničenje u smanjivanju mjerne nesigurnosti je nedostatak skupe mjerne opreme.

Mjerenje hrapavosti

Laboratorij na području mjerenja hrapavosti postiže razinu mjerne nesigurnosti od $\pm 5\%$. HMI/FSB-LPMD je osmislio, a zatim u suradnji s tvrtkom RIZ (Radio industrija iz Zagreba) i realizirao niz referentnih etalona hrapavosti. Ti etaloni su dobili potvrdu svoje visoke kvalitete od priznatih svjetskih instituta (INRIM, PTB). 1994. godine laboratorij je dobio međunarodnu akreditaciju za umjeravanje etalona hrapavosti i uređaja za ispitivanje hrapavosti od strane SIT-a (*Servizio di taratura in Italia*). Dva etalona HMI/FSB-LPMD-a i jedan etalon proizvođača Perthen proglašeni su 2007. godine državnim etalom hrapavosti.

Djelatnost laboratorija odvija se u tri vida: nastavna djelatnost, znanstveni rad i stručna djelatnost. Od 1973. HMI/FSB-LPMD je nositelj znanstvenih projekata iz područja mjeriteljstva. Djelatnici su u proteklom razdoblju objavili više desetaka znanstvenih radova u domaćim i međunarodnim časopisima i skupovima. Stručna djelatnost HMI/FSB-LPMD-a se zasniva na uslugama umjeravanja etalona i mjernih sredstava duljine, kuta i hrapavosti. Svi postupci umjeravanja etalona i mjernih sredstava obavljaju se na temelju dokumentiranih postupaka u kojima je naznačena korištena oprema za provedbu umjeravanja, objašnjen postupak umjeravanja i proveden račun mjernih nesigurnosti. Etaloni prve linije HMI/FSB-LPMD-a sukladno određenoj vremenskoj učestalosti umjeravaju se u jednom od europskih mjernih instituta.[1]

1.1 Osiguranje sljedivosti

Tri glavna zadatka mjeriteljstva su:

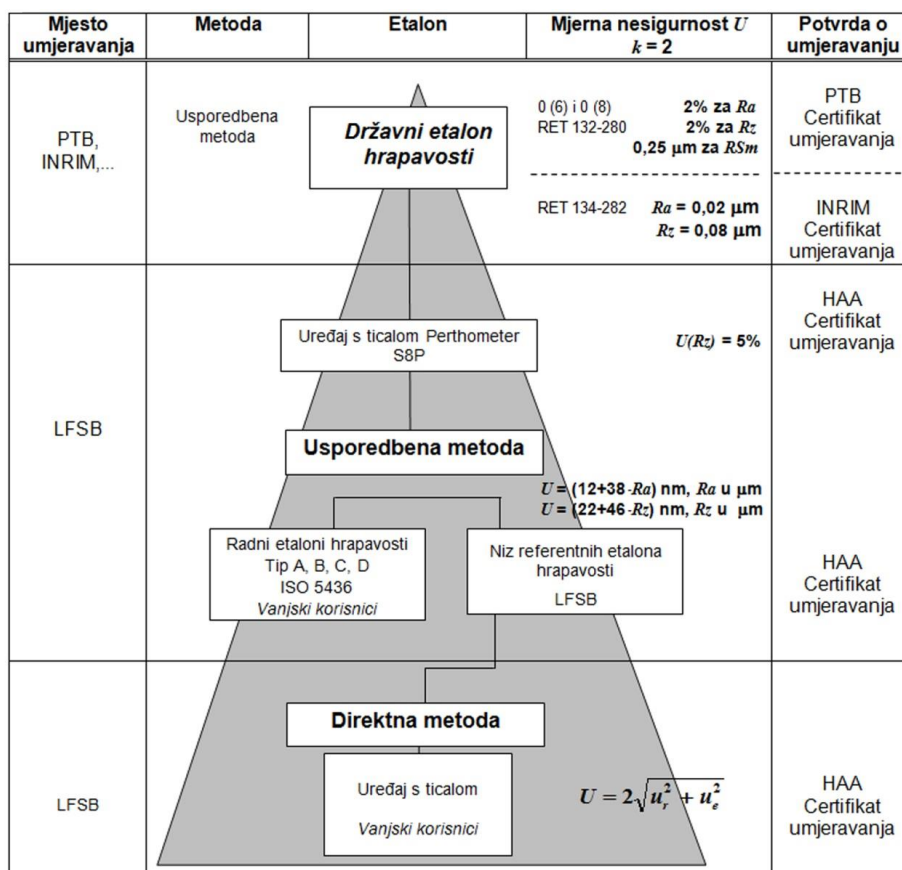
1. definiranje međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica,
2. ostvarenje mjernih jedinica znanstvenim metodama,
3. utvrđivanje lanca sljedivosti pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i točnosti mjerenja i prenošenju tog znanja

Jedan od najvažnijih zadataka HMI/FSB-LPMD-a je osiguranje mjerne sljedivosti. Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s referencijskim etalonima (državnim ili međunarodnim) korištenjem neprekinutih lanaca umjeravanja od kojih svako umjeravanje doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. To bi značilo da se dobiveni rezultat mjerenja nastoji koracima unatrag dovesti u vezu s primarnim etalom. Lanac sljedivosti je neprekidan lanac usporedaba, od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Time se osigurava da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini koji u krajnosti završavaju primarnim etalom.

Etalon je mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine kako bi mogli poslužiti kao referenca. [2]

U HMI/FSB-LPMD-u mjerna sljedivost propisana je Priručnikom o kvaliteti i osigurava se na sljedeće načine:

- Etaloni prvog reda za duljinu, kut i hrapavost umjeravaju se u jednom od europskih nacionalnih mjeriteljskih instituta.
- Provjera i potvrđivanje mjernih nesigurnosti u postupcima umjeravanja radnih etalona (etaloni za navoj, mjerni prsteni, mjerni čepovi, mjerne skale...) provjeravaju se u redovitim usporedbenim mjerenjima unutar LABCOM grupe.
- Umjeravanje, odnosno osiguravanje sljedivosti za čitav niz sekundarnih i radnih etalona, te mjernih uređaja provodi se interno u Laboratoriju korištenjem etalona prve linije. [1]



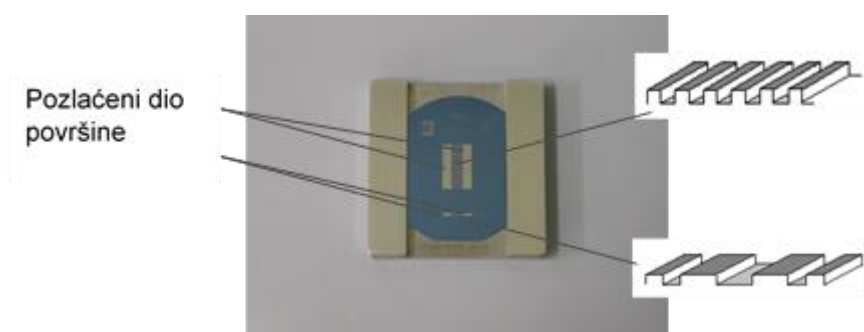
Slika 1. Osiguravanje sljedivosti za hrapavost u HMI/FSB-LPMD-u

Sa Slike 1. se može očitati sljedeće:

- državni etalon hrapavosti umjerava se u jednom od nacionalnih mjeriteljskih instituta Europske unije (PTB, INRIM...),
- na tom se etalonu u HMI/FSB-LPMD-u umjerava uređaj s ticalom Perthometer S8P,
- usporednom metodom se na Perthometru S8P umjeravaju radni etaloni hrapavosti za vanjske korisnike i niz referentnih etalona hrapavosti HMI/FSB-LPMD-a,
- preko niza referentnih etalona direktnom metodom umjeravaju se uređaji s ticalom za vanjske suradnike.

1.2 Etaloni hrapavosti

Etaloni hrapavosti sadrže dvije mjerne površine, jednu sa slijedom pravokutnih brazdi a druga sadrži tri široke pravokutne brazde od kojih je srednja najšira.



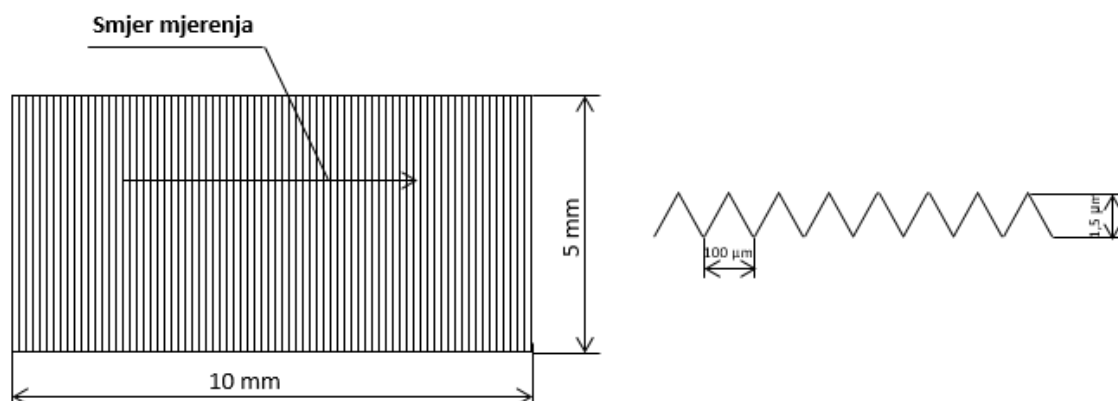
Slika 2. Mjerna površina

Mjerna površina (Slika 2.) sa tri široke brazde (Slika 3.) nalazi se unutar donjeg pravokutnika koji je obrubljen uskom brazdom i služi za umjeravanje uređaja koji se podešavaju etalom sa samo jednom brazdom. Sa svake strane nalazi se pozlaćeni dio površine koji služi za interferencijska mjerenja dubine brazde. [3]

Na Slici 5. prikazan je etalon hrapavosti Perthen, a na Slici 6. veličina mjerne površine etalona uz prikazanu geometriju pravokutnog profila hrapavosti.



Slika 5. Etalon hrapavosti Perthen



Slika 6. Veličina mjerne površine i geometrija etalona hrapavosti Perthen

Dva etalona HMI/FSB-LPMD-a i jedan etalon proizvođača Perthen proglašeni su 2007. godine državnim etalonom hrapavosti. Državni etalon za hrapavost sastoji se od sljedećih komponentata [3]:

Etalon hrapavosti $Ra = 0,42 \mu\text{m}$:

- proizvođač MAHR-Perthen,
- serijski broj 6453,
- vrsta: Tip C s valovitim brazdama,
- materijal: staklo.

Etalon hrapavosti $Ra = 0,810 \mu\text{m}$:

- proizvođač LFSB-RIZ,
- serijski broj 0-6,
- vrsta: Tip C s pravokutnim brazdama,
- materijal: monokristal silicija sa slojem SiO_2 .

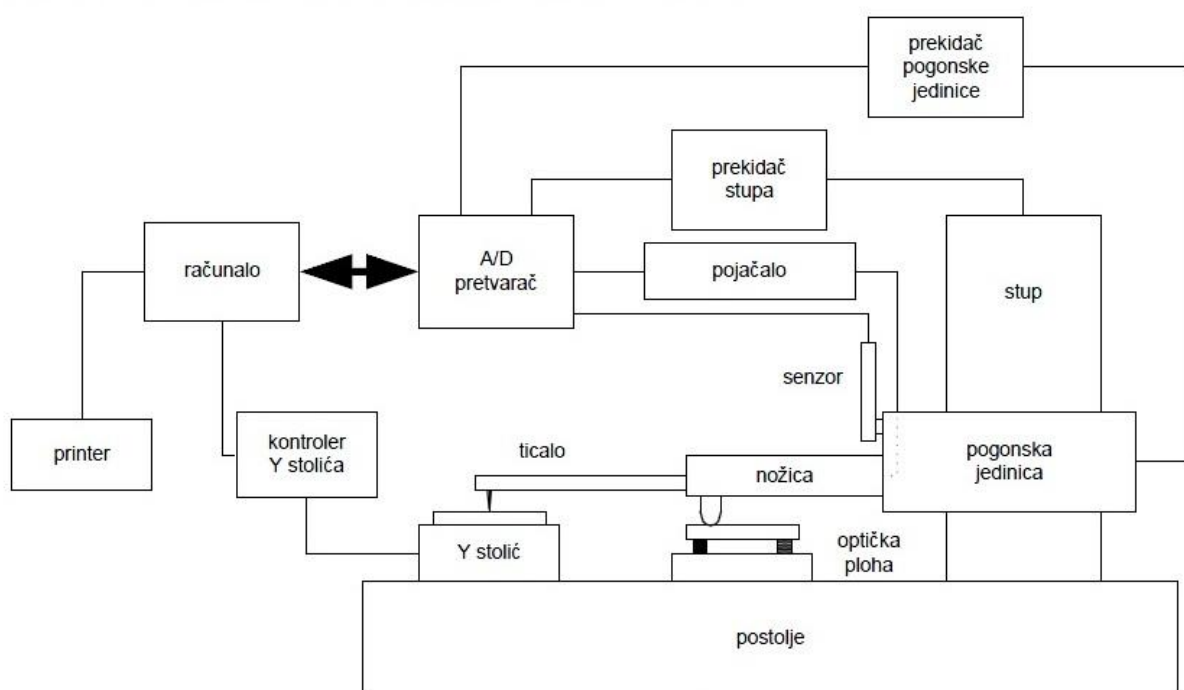
Etalon hrapavosti $Ra = 1,878 \mu\text{m}$:

- proizvođač LFSB-RIZ,
- serijski broj 0-8,
- vrsta: Tip C s pravokutnim brazdama,
- materijal: monokristal silicija sa slojem SiO_2 .

Etaloni hrapavosti definirani su standardom *ISO 5436-1:2000*.

2. Mjerni uređaji s ticalom

Mjerni uređaji s ticalima se najduže koriste za ispitivanje topografije površine. Prvi 3D uređaj s ticalom izumljen je 1960-ih godina, dok su Sayles i Thomas 1976. godine dovršili prvi sustav upravljan računalom. Računalo je upravljački centar koji kontrolira cijeli proces mjerenja. Translacija u smjeru X je ostvarena pomoću step motora ili linearnog motora koji se nalazi u pogonskoj jedinici. Mjerna ravnina je ostvarena pomoću odnosa optičke plohe ispod nožice i Y stolića. Kako ticalo ide po površini uzorka, nožica pretvara mehaničko gibanje ticala u analogni signal koji se pojačava u pojačalu. Nakon toga analogni signal se digitalizira u A/D pretvaraču i prosljeđuje do računala. Konstrukcija uređaja s ticalom prikazana je na Slici 6. [3]

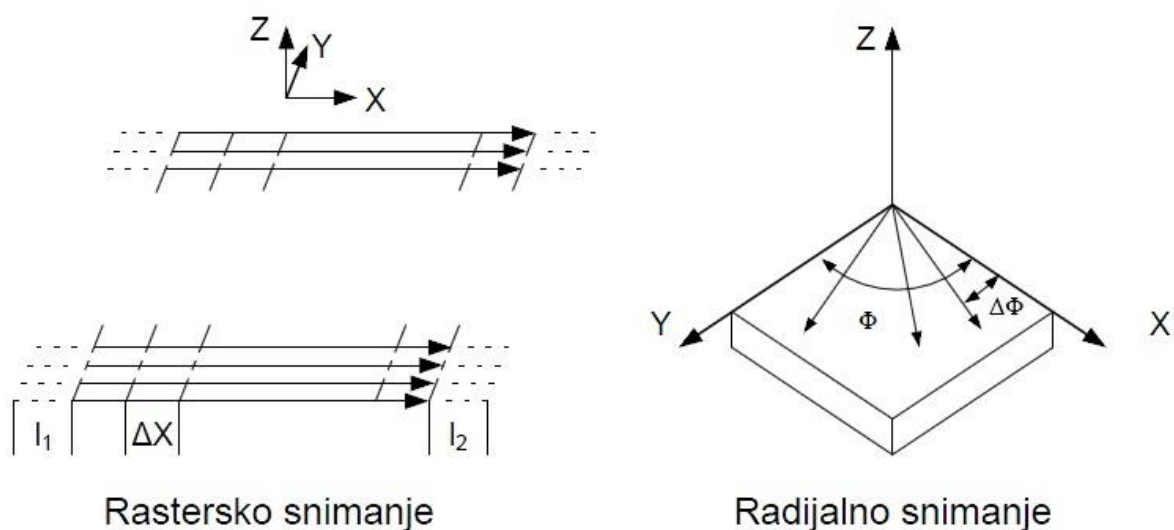


Slika 7. Konstrukcija mjernog uređaja sa ticalom

Ispitivanje površine vrši se iglom ticala duž pravca mjerenja. Vertikalni pomaci igle, koji su proporcionalni neravninama na površini, pretvaraju se u električni signal, na osnovu kojeg se stvarna slika profila može učiniti vidljivom u obliku dijagramskog zapisa te se može odrediti jedan ili više parametara hrapavosti. Elementi uređaja s ticalom mogu se, prema funkciji, podijeliti u dvije osnovne grupe: sklopovi namijenjeni za vođenje i pretvorbu mehaničkog pomaka igle ticala u električni signal (dobivanje informacija o stanju realnog profila), a sastoje se od ticala i mjerne glave; sklopovi namijenjeni za obradu dobivenog električnog signala

(obrada dobivene informacije), a sastoje se od pisača i računalne jedinice. Postoje različite konstrukcijske izvedbe ticala, ali svaka sadrži tri osnovna elementa; iglu, pretvornik i referentnu površinu za relativno vođenje ticala u obliku nožice ili ravnine. Igla je sama po sebi izvor pogreške kod mjerenja zbog radijusa vrha. Pomoću pretvornika vertikalna komponenta pomaka igle ticala pretvara se u proporcionalan napon. Među pretvornicima različitih koncepcija uglavnom se susreću tri tipa (induktivni pretvornik, piezoelektrični pretvornik i optički pretvornik). Razlikujemo 2D i 3D uređaje s ticalom. Kod 2D uređaja, ticalo ima vrh malog polumjera koji prelazi preko mjerne površine u jednom smjeru. Nožica koja je ili LVDT (*linear variable differential transformer*) ili optički pretvornik pretvara vertikalno gibanje ticala u električni signal. Kod 3D uređaja potrebna je još jedna dimenzija. [3]

Razlikujemo dvije metode mjerenja 3D uređaja s ticalom: rastersko snimanje i radijalno snimanje (Slika 7.).



Slika 8. Metode mjerenja 3D uređaja s ticalom

Kod rasterskog snimanja se uzima određeni broj bliskih paralelnih tragova profila. Prve dvije dimenzije X i Z su realizirane snimanjem 2D profila, dok je treća dimenzija Y ostvarena snimanjem paralelnih profila. Kod radijalnog snimanja profili su dobiveni u odnosu na radijalne kutove. Svi profili imaju istu početnu točku. Treća dimenzija se ostvaruje tako da se sljedeći profili snima s kutnim pomakom $\Delta\Phi$. Ova metoda se rijetko koristi u suvremenim uređajima zbog problema izvedivosti same konstrukcije i otežane vizualizacije. [3]

2.1 Uređaji za ispitivanje hrapavosti

Postoje dvije metode za ispitivanje hrapavosti: kontaktna i bezkontaktna. HMI/FSB-LPMD za kontaktnu metodu ispitivanja hrapavosti koristi uređaj s ticalom Perthometer S8P (Slika 8.).



Slika 9. Perthometer S8P

Na slici je prikazan uređaj s ticalom (lijevo) i ispitni uzorak po čijoj se površini kreće ticalo. Postolje uređaja je izrađeno od mramora da bi se eliminirao utjecaj vibracija. Ticalo se nastavlja na senzor koji šalje podatke računalu i na monitoru se prikazuje izabrani profil hrapavosti. Uređaj je prvenstveno namijenjen 2D mjerenju hrapavosti, odnosno ispitivanju profila i izračunavanju 2D parametara hrapavosti. Na njemu je moguće dobiti i prikaz topografije površine koji je dobiven rasterskim snimanjem više profila, ali nije moguće izračunati 3D parametre hrapavosti. Uređaj se umjerava prema vodiču DKD-R 4-2.

U Tablici 1. prikazani su osnovni tehnički podaci o uređaju Perthometer S8P. [4]

Tablica 1. Osnovni podaci o uređaju Perthometer S8P

Proizvođač	Feinprüf Perthen GmbH, Njemačka
Tragovi	Od 4 do 128 sa 8064 točaka po tragu
Duljina očitavanja [mm]	0,56; 1,75; 5,6; 17,5; 56,0
Standardni mjerni putovi [mm]	0,4; 1,25; 4,0; 12,5; 40
Cut-off (granične valne dužine) [mm]	0,025; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8,0
Mjerni opseg [μm]	$\pm 12,5\mu\text{m}$, $\pm 62,5\mu\text{m}$, $\pm 125\mu\text{m}$, $\pm 625\mu\text{m}$, $\pm 2500\mu\text{m}$
Profili	D – direktni G – ispravljeni P – ispravljen bez početnog i završnog dijela W – valovitost R – hrapavost
Tip filtera	Gaussov filter, RC filter, osni filteri (cut-off kod 75% i 50%)

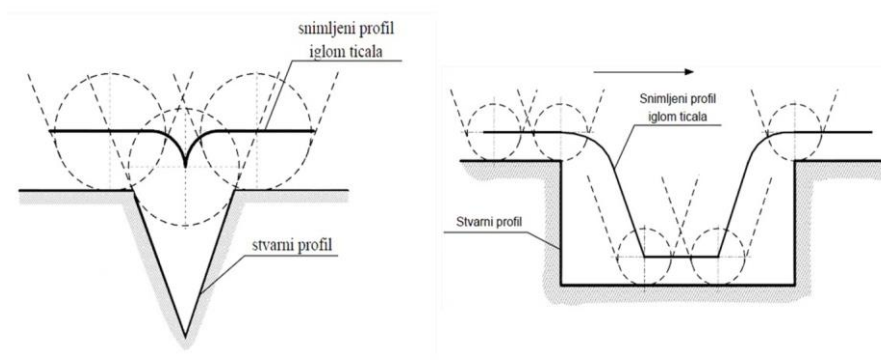
2.2 Pogreške koje se javljaju kod mjerenja

Postoje tri vrste pogrešaka koje se javljaju kod mjerenja neke površine, a to su:

1. greške zbog radijusa vrha ticala,
2. greške zbog izvedbe referentne površine,
3. greške zbog pogrešnog odabira *cut-off* valne duljine

Najpovoljniji dodir, s mjeriteljskog stajališta, između igle i ispitivane površine trebao bi biti u matematički definiranoj jednoj točki. To nije ostvarivo te se igla izrađuje u piramidalnom ili stožastom obliku sa zaobljenim vrhom polumjera r . Jedna od grešaka kod snimanja profila

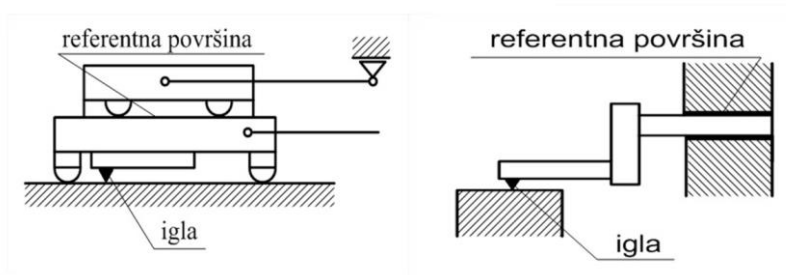
proizlazi iz radijusa vrha ticala te je snimljeni profil drugačiji od stvarnog. Idealan oblik vrha ticala je stožac sa zaobljenim vrhom. Na Slici 9. prikazan je utjecaj radijusa igle ticala na snimljeni profil. [3]



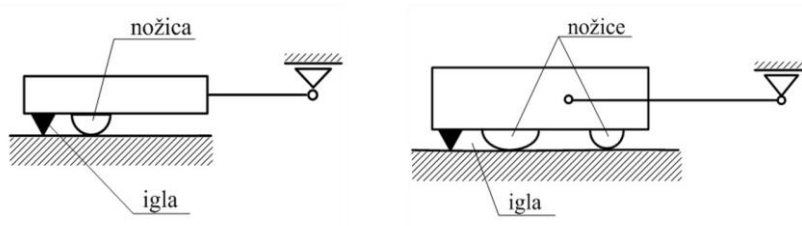
Slika 10. Utjecaj radijusa igle ticala na snimljeni profil

Daljnji izvor pogreške je način vođenja igle ticala (Slika 10. i 11.), a postoje dvije vrste:

- vanjsko vođenje
- vođenje s nožicom

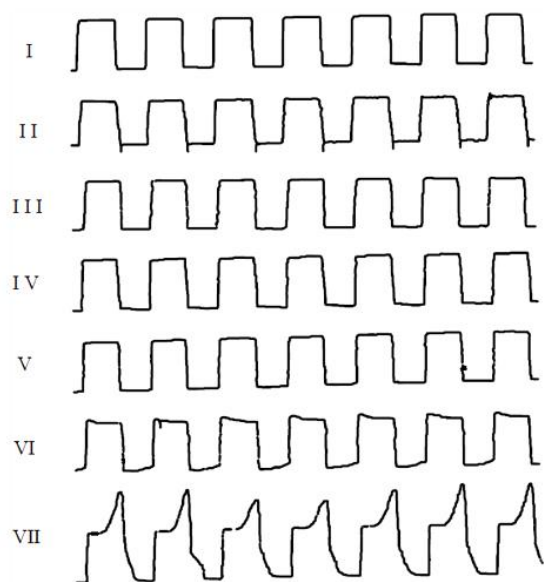


Slika 11. Vanjsko vođenje



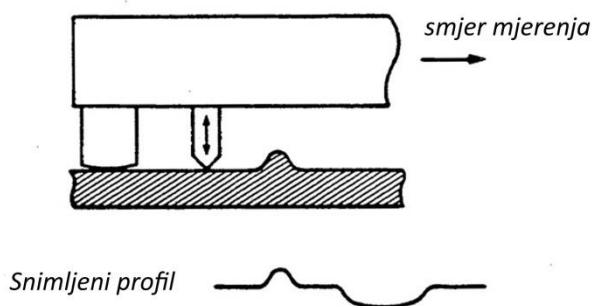
Slika 12. Vođenje s nožicom

Zbog različitog načina vođenja igle ticala razlikovat će se i izgled snimljenog profila. Ako se koriste nožice sa sfernim oblikom (na slici izgleda profila označeno sa VII) profil će biti izobličen tako da će svi očitani parametri biti netočni (Slika 12.). [3]



Slika 13. Ovisnost načina vođenja igle ticala o izgledu profila

Postoji još jedan primjer pogreške gdje nožica uzrokuje grešku prilikom prelaženja preko neke izbočine. Na Slici 13. prikazan je navedeni slučaj. Igla prvo prijeđe preko izbočine i dobiva se točan zapis, međutim kad nožica prijeđe preko izbočine igla se podigne i stvara se slika udubljenja koje ne postoji jer nožica služi kao referentna površina. [3]

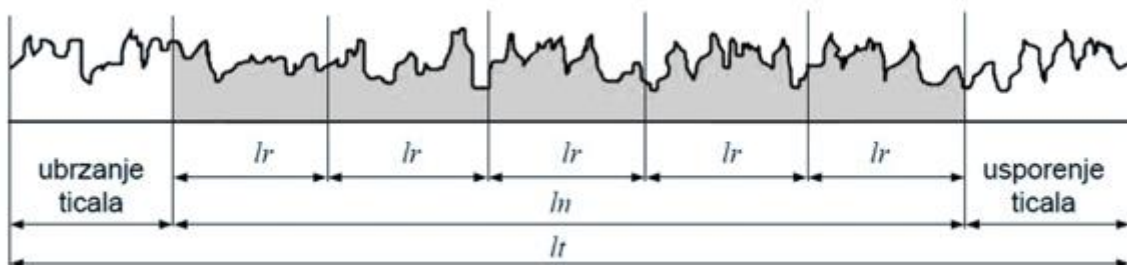


Slika 14. Greška zbog utjecaja nožice

Posljednja greška je prouzrokovana pogrešnim izborom *cut-off* valne duljine. To je valna duljina ispod ili iznad koje se filtrira površina kako bi se dobio željeni raspon frekvencije.

3. Parametri hrapavosti

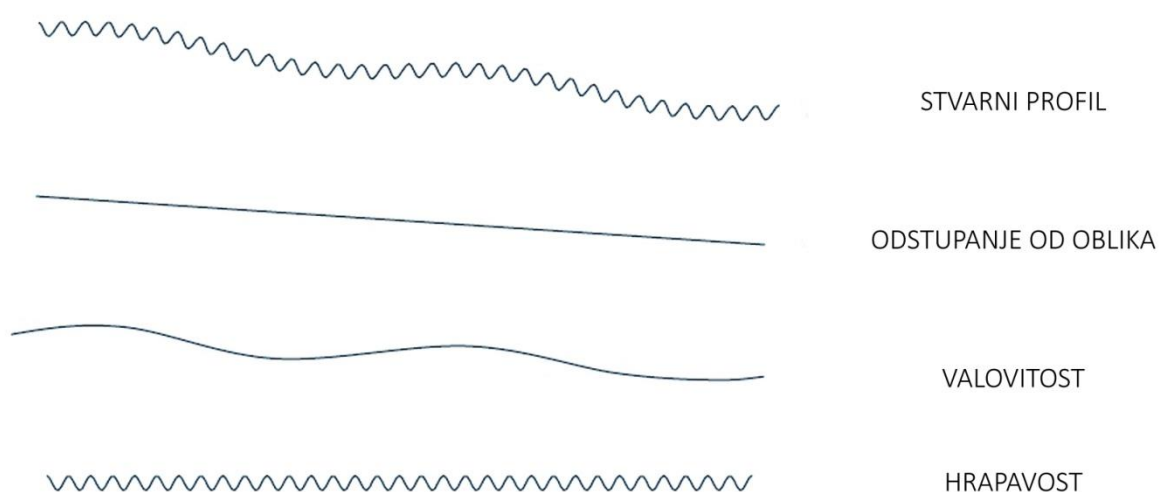
Duljina ispitivanja l_t sastoji se od duljine vrednovanja l_n , koja se nadalje dijeli na niz referentnih duljina l_r , l_w ili l_p (l_r – hrapavost, l_w – valovitost, l_p – primarni profil) (Slika 14.). Duljina ispitivanja je manja od duljine vrednovanja za dijelove površine gdje se odvija ubrzavanje ili usporavanje ticala, odnosno vrednuje se samo duljina gdje je brzina ticala konstantna. Referentne duljine za hrapavost l_r i valovitost l_w su jednake valnoj duljini filtera profila λ_c i λ_f , a referentna duljina za primarni profil l_p je jednaka duljini vrednovanja l_n . [3]



Slika 15. Duljina ispitivanja, duljina vrednovanja i referentna duljina

3.1 Filtriranje površine

Snimanjem površine uređajima za ispitivanje površine dobije se stvarni profil. Procesom filtriranja odvajaju se određene valne duljine s ciljem izdvajanja oblika, valovitosti ili hrapavosti (Slika 15.)



Slika 16. Odstupanje na stvarnom profilu

Odstupanje od oblika uključuje odstupanje od zadanog oblika. Odstupanja od oblika posljedica su niza problema u proizvodnom procesu, kao što su greške na alatu, vodilicama, osovinama, kod stezanja ili netočnog pozicioniranja izradka. Osim toga, greške oblika su najčešće uzrokovane pomanjkanjem krutosti izratka tijekom strojne obrade kao posljedice savijanja i elastičnosti. Napetosti u materijalu površine izazvane zagrijavanjem ili velikim zaostalim naprezanjem na površini može dovesti do savijanja i grešaka oblika. Greške oblika spadaju u grupu marko geometrijskih odstupanja.

Valovitost je komponenta teksture kojoj se dodaje hrapavost. Iskazuje se u obliku dugih valova na površini u odnosu na geometrijsku površinu. Može biti rezultat mnogih faktora kao greške stroja ili izratka, vibracija, unutrašnjih naprezanja u materijalu i dr. Valovitost je najčešće posljedica svojstava stroja.

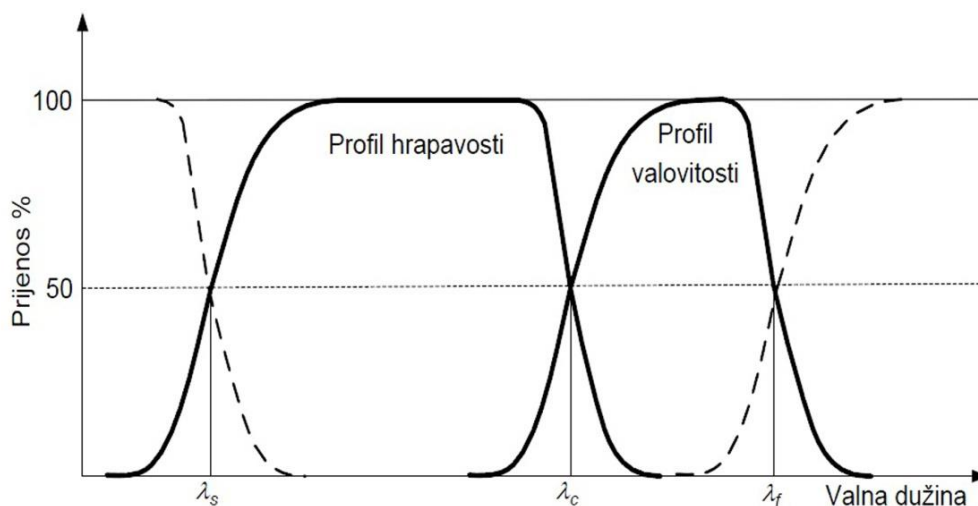
Hrapavost je komponenta površine visoke frekvencije i male valne duljine. Rezultat je nepravilnosti na površini koja je svojstvena postupku obrade, ali koja ne uključuje valovitost,

odstupanje od oblika i površinske greške. Pod hrapavošću podrazumijevamo sveukupnu nepravilnost površine s relativno malim koracima koji obično uključuju neregularnosti koje su rezultat primijenjenog postupka obrade ili drugih utjecaja. [3]

Ovisno o tome koja se komponenta želi dobiti postupak filtriranja može biti:

- propuštanje kratkih valnih duljina (visoke frekvencije): hrapavost,
- propuštanje dugih valnih duljina (niske frekvencije): valovitost, oblik,
- izdvajanje komponenti određene širine upotrebom oba filtera.

Kod filtriranja površine javlja se pojam *Cut-off* (granična vrijednost filtera) koji određuje graničnu valnu duljinu ispod ili iznad koje su komponente izdvojene ili eliminirane (Slika 16.). [5]



Slika 17. Prijenosne karakteristike profila hrapavosti

ISO 4287:1997 definira tri vrste filtera [5]:

- λ_s filter profila: sjecište između hrapavosti i još kraćih valnih duljina,
- λ_c filter profila: sjecište između hrapavosti i valovitosti,
- λ_f filter profila: sjecište između valovitosti i još duljih valnih duljina.

3.2 2D parametri hrapavosti

Postoje tri vrste profila [6]:

- primarni P (engl. *primary*): stvarni profil bez komponente oblika,
- profil hrapavosti R (engl. *roughness*),
- profil valovitosti W (engl. *waviness*).

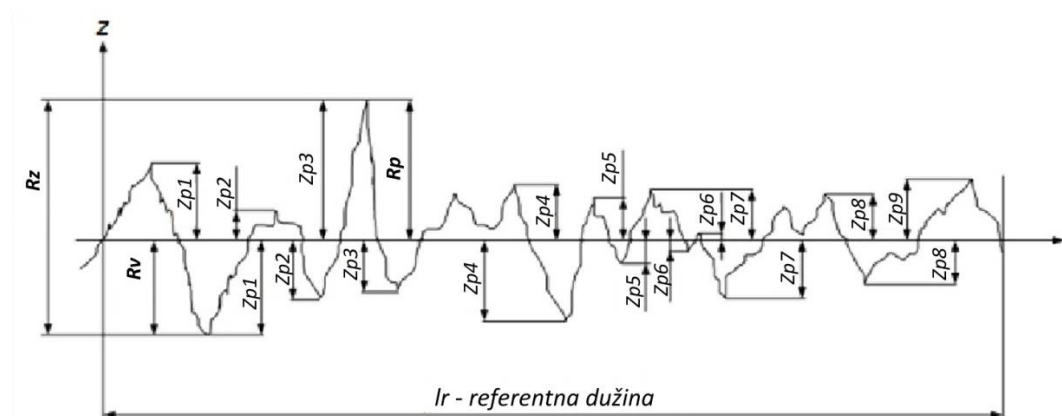
Ovisno kojem profilu pripadaju, parametri sadrže oznaku profila. Kod procjene hrapavosti površine u strojarskoj praksi najčešće se koristi parametar srednjeg aritmetičkog odstupanja profila hrapavosti Ra .

Parametri hrapavosti dijele se na:

- amplitudne: opisuju varijacije po visini profila,
- uzdužne: opisuju varijacije uzduž profila,
- hibridne: opisuju varijacije iz kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila
- krivuljne i srodne: opisuju varijacije na krivuljama dobivenih iz uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila

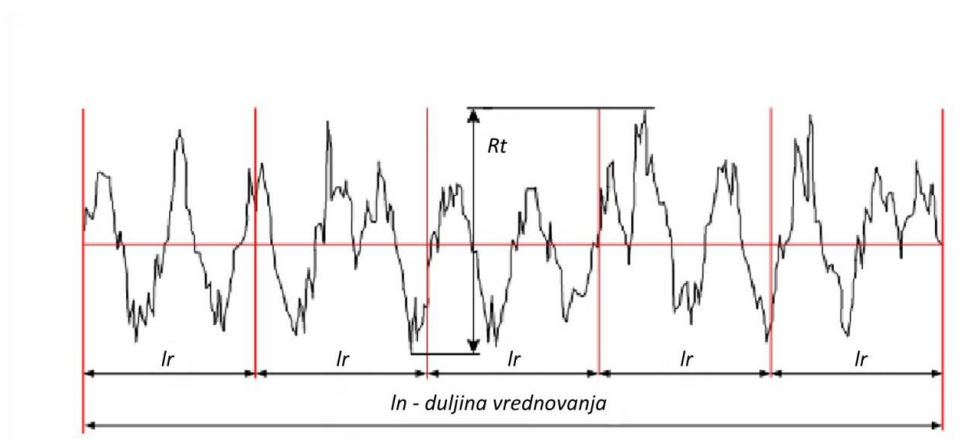
3.2.1 Amplitudni parametri

Najveća visina vrha profila označena je oznakom Z_p i označava najveći vrh profila unutar referentne duljine $l_r / l_w / l_p$. Najveća dubina dola profila označena je sa Z_v i označava najveću dubinu dola profila unutar referentne duljine. Najveća visina profila P_z , R_z , W_z označava sumu visine najvećeg vrha profila i najveće dubine dola unutar referentne duljine. Za profil hrapavosti najveća visina vrha profila je R_p , a najveća dubina dola R_v (Slika 17.). [6]



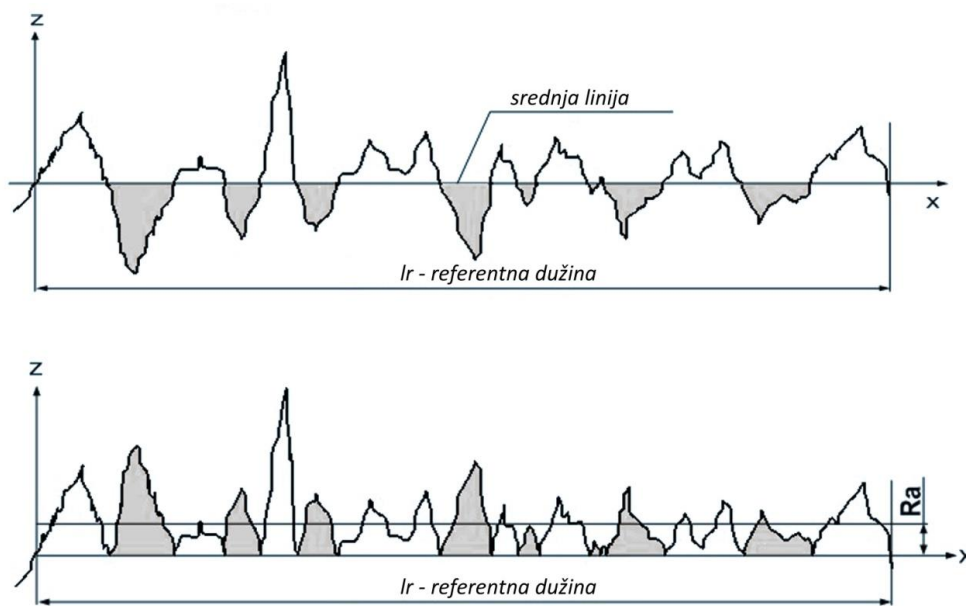
Slika 18. Parametri R_p , R_v i R_z na referentnoj duljini l_r

Parametar R_t predstavlja sumu najvećeg vrha profila i najveće dubine dola unutar duljine vrednovanja l_n (Slika 18.)



Slika 19. Ukupna visina profila R_t

Amplitudni parametri koji predstavljaju prosjeke odstupanja profila su R_a , R_q , R_{sk} i R_{ku} . Parametar R_a (Slika 19.) označava srednje aritmetičko odstupanje apsolutne vrijednosti ordinate $Z(x)$ unutar referentne duljine l_r .



Slika 20. Srednje aritmetičko odstupanje Ra

Parametri Ra , Pa i Wa izračunavaju se prema sljedećem izrazu:

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx.$$

Parametar Rq označuje srednje kvadratno odstupanje ordinate unutar referentne duljine lr , a izračunava se po sljedećem izrazu:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx}.$$

Parametar Rsk predstavlja kvocijent srednje kubne vrijednosti ordinate $Z(x)$ i kubne vrijednosti Rq , unutar referentne duljine lr , a izračunava se po sljedećem izrazu:

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right]$$

Rku je koeficijent oštrote profila površine, a predstavlja kvocijent srednje vrijednosti četvrte potencije ordinate $Z(x)$ i četvrte potencije parametra Rq , unutar referentne duljine lr , a računa se prema izrazu:

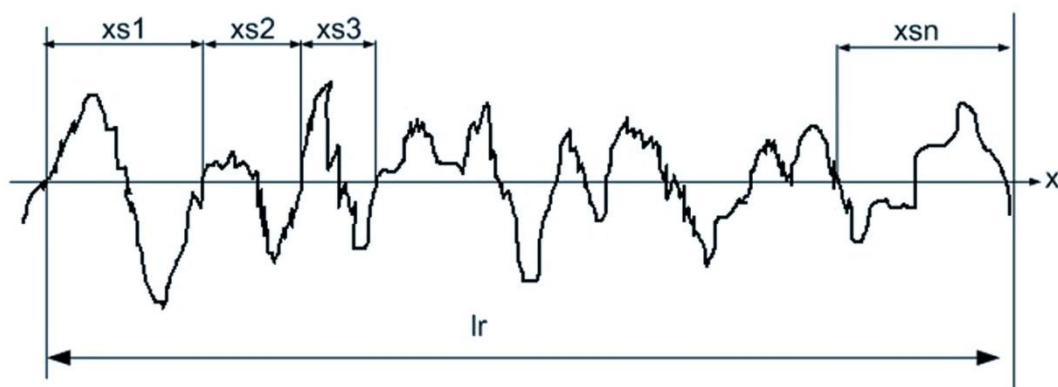
$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right]$$

3.2.2 Uzdužni parametri

Predstavnik uzdužnih parametara je srednji korak elementa profila RSm (Slika 20.) tj. srednja vrijednost širine elemenata profila Xs unutar referentne duljine lr , koji se računa izrazom [6]:

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i,$$

gdje je m broj elemenata profila.



Slika 21. Srednji korak elemenata profila Rsm

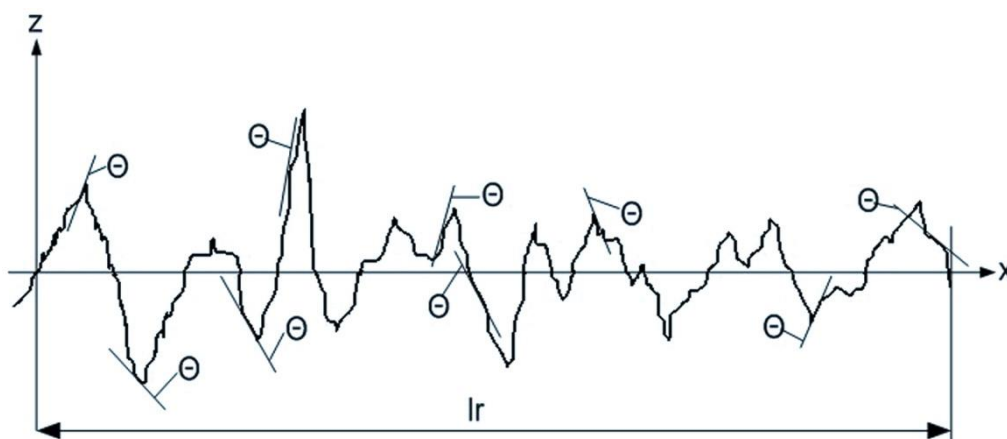
Od ostalih uzdužnih parametara navedeni su broj lokalnih vrhova profila HSC (za ln) i broj vrhova elemenata profila Pc (za ln).

3.2.3 Hibridni parametri

Predstavnik hibridnih parametara je srednji kvadratni nagib profila $R\Delta q$ [6]:

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} (\theta(x) - \bar{\theta})^2 dx}, \quad \bar{\theta} = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} \theta(x) dx,$$

gdje je θ nagib profila u bilo kojoj danoj točki (Slika 21.).

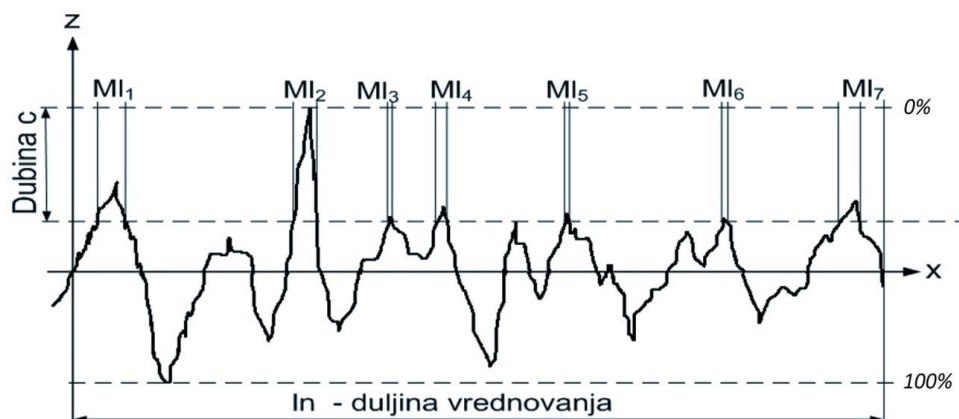


Slika 22. Srednji kvadratni nagib profila $R\Delta q$

3.2.4 Krivulje i srodni parametri

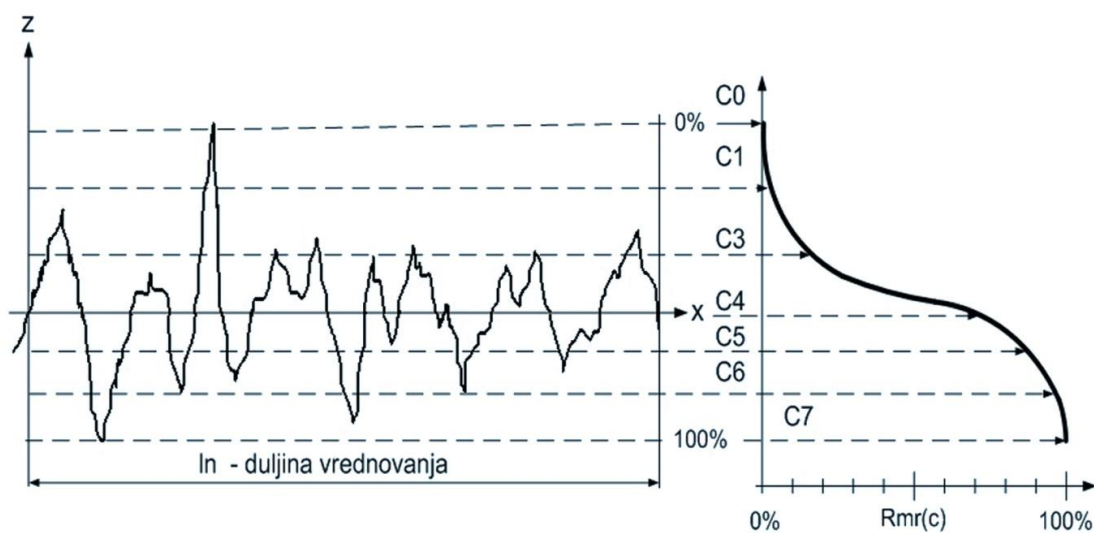
Sve krivulje i srodni parametri definirani su za duljinu vrednovanja ln , a ne za referentnu duljinu jer navedeno uzrokuje stabilnije krivulje i parametre. Parametar $Rmr(c)$ (Slika 22.) predstavlja udio materijala u profilu, a izračunava se pomoću izraza [6]:

$$Rmr(c) = \frac{Ml(c)}{ln}.$$



Slika 23. Udio materijala u profilu $Rmr(c)$

Krivulja udjela materijala profila, odnosno Abbot – Firestone krivulja (Slika 23.), predstavlja kumulativnu funkciju vjerojatnosti vrijednosti ordinate $Z(x)$, unutar duljine vredovanja l_n .



Slika 24. Abbot – Firestone krivulja udjela materijala profila

Parametri hrapavosti za krivulju udjela materijala dijele se na primarne i sekundarne (Slika 24.).

Primarni su:

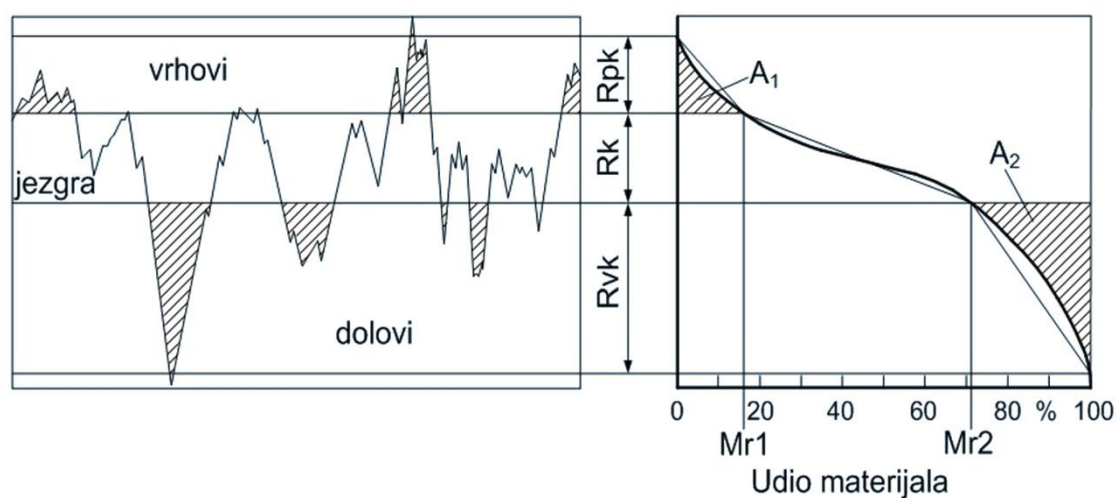
- Rpk : reducirana visina vrha profila, dio profila koji će tijekom eksploatacije prvi biti istrošen,
- Rk : dubina jezgre hrapavosti profila, dio profila s povećanom nosivosti koja preuzima osnovna opterećenja i bitno utječe na karakteristike i životni vijek površine,

- Rvk : reducirana dubina dolova profila, dio profila koji ima sposobnost zadržavanja ulja u dubokim žljebovima koji su stvoreni pri strojnoj obradi površine,

- $Mr1$: relativni udio materijala u vrhovima,
- $Mr2$: relativni udio ulja u dolovima,

a sekundarni:

- $A1$: površina materijala vrhova profila i
- $A2$: površina maziva dolova profila.



Slika 25. Parametri harapavosti: krivulja udjela materijala

4. Etaloni za umjeravanje uređaja s ticalom za ispitivanje hrapavosti površine

Umjeravanje uređaja s ticalom različitih mjernih karakteristika u različitim izvedbama zahtjeva više tipova etalona za umjeravanje. Svaki etalon za umjeravanje ima ograničeno područje primjene prema svojim karakteristikama koje su usko vezane uz konstrukciju i mjerne karakteristike uređaja s ticalom s kojim su isporučeni kao obavezan pribor. Podjela etalona za umjeravanje propisana je standardom *ISO 5436-1:2000*. Etaloni se izrađuju od stakla ili metala kojemu je tvrdoća veća od 750 HV na dovoljno glatkoj i ravnoj površini. [7]

Tablica 2. Tipovi i nazivi etalona za umjeravanje

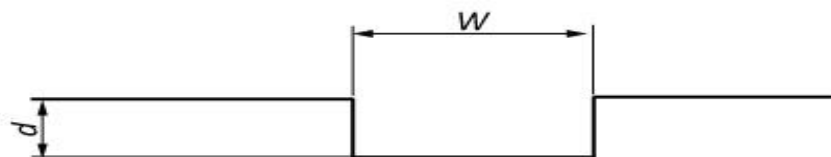
TIP	NAZIV
A	etalon dubine brazde
B	etalon provjere stanja igle ticala
C	etalon valovitosti
D	etalon hrapavosti
E	etalon profila koordinata

4.1 Tip A — etalon dubine brazde

Postoje dva tipa etalona dubine: A1 i A2. Etalon dubine koristi se kod umjeravanja uređaja s ticalom, a zbog širine brazde kod umjeravanja vertikalne komponente uređaja radijus vrha ticala nema utjecaja na rezultat. [7]

Tip A1

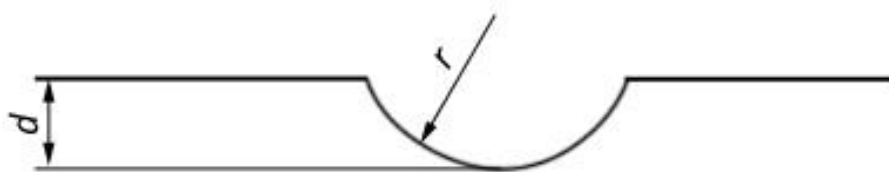
Etaloni tipa A1 imaju široke brazde sa ravnim dnom ili više tako odvojenih brazdi jednake ili povećane dubine ili širine. Svaka brazda je dovoljno široka da bude neosjetljiva na oblik ili stanje igle ticala. Široke brazde sa ravnim dnom su karakterizirane sa širinom w i dubinom d . [7]



Slika 26. Tip A1

Tip A2

Ovi etaloni za umjeravanje su isti kao tip A1, osim što brazde imaju zaobljeno dno dovoljnog radijusa da bude neosjetljiv na oblik i stanje igle ticala. Karakterizirani su sa dubinom d i radijusom r . [7]



Slika 27. Tip A2

4.2 Tip B — etalon provjere stanja igle ticala

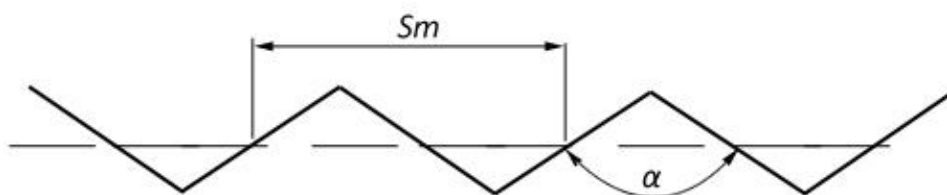
Etaloni tipa B koriste se prvenstveno za umjeravanje stanja vrha ticala. ISO standardom definirane su tri vrste: B1, B2 i B3. [7]

Tip B1

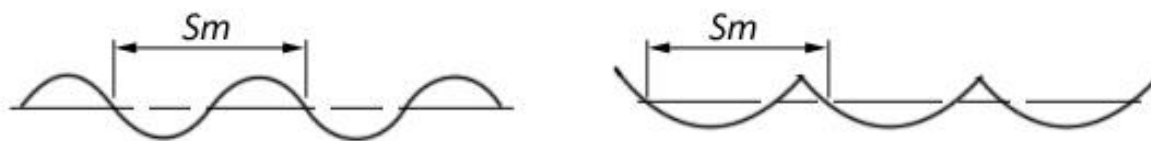
Ovi etaloni imaju usku brazdu ili nekoliko odvojenih brazdi razmjernih sa povećanjem osjetljivosti na dimenzije igle ticala. Uske brazde imaju okruglo dno radijusa dovoljnog da budu osjetljive na oblik ili stanje igle ticala. Uske brazde na ovom etalonu karakterizirane su radijusom r i dubinom d .

Tip B2

Etaloni tipa B2 imaju dvije (ili više) brazdi jednake nazivne Ra vrijednosti, jedna osjetljiva na dimenzije igle ticala, a druga neosjetljiva na dimenzije igle ticala. Parametar Ra predstavlja srednje aritmetičko odstupanje apsolutne vrijednosti ordinate $Z(x)$ unutar referentne duljine l_r (detaljnije u idućem poglavlju) za profil hrapavosti. Parametar Sm (RSm za profil hrapavosti, WSm za valovitost, PSm za primarni profil) je uzdužni parametar koji predstavlja srednji korak elementa profila, odnosno srednju vrijednost širine elemenata profila X_s unutar referentne duljine l_r .



Slika 28. Tip B2



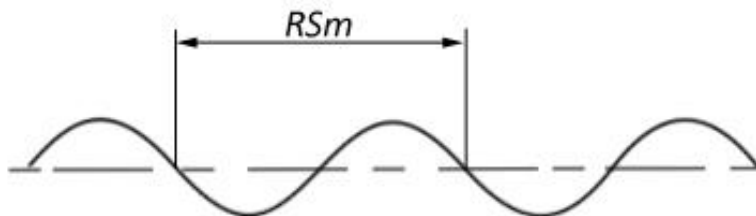
Slika 29. Tip B2

4. 3 Tip C — etalon valovitosti

Ovaj tip etalona za umjeravanje koristi se, u prvom redu za umjeravanje vertikalnih komponenti profila. Također se može koristiti za umjeravanje horizontalnih komponenti profila ako se razmak između brazdi drži unutar granica prihvatljivih za ovu svrhu. Svrha ove serije etalona je da omoguće provjeru prijenosne karakteristike za više razmaka i amplituda. Sadrže mrežu ponavljajućih brazdi jednostavnog oblika (sinusoidni, trokutasti ili žljebasti oblik).

Tip C1

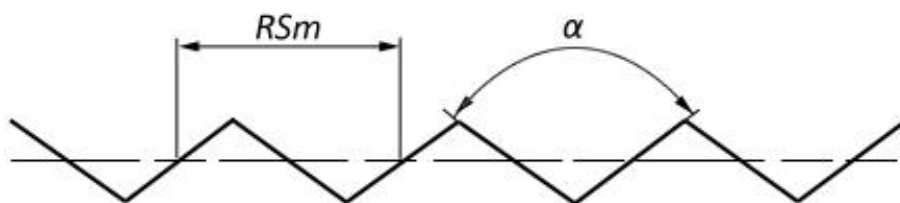
Etaloni tipa C1 imaju brazde sa sinusoidnim profilom. Ovi etaloni su karakterizirani sa RSm i Ra .



Slika 30. Tip C1

Tip C2

Etaloni tipa C2 imaju brazde sa trokutastim profilom, te su karakterizirani također sa RSm i Ra .



Slika 31. Tip C2

Tip C3

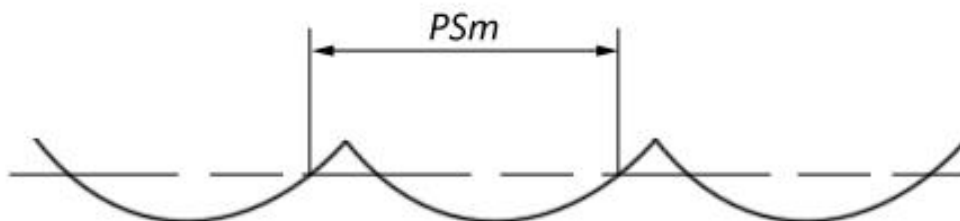
Etaloni tipa C3 sadrže simulirane sinusoidne brazde. Karakterizirani su sa parametrima RSm i Ra . Oni simuliraju sinusoidni profil, koji uključuje trokutasti profil sa zaobljenim ili odrezanim vrhovima i dolovima.



Slika 32. Tip C3

Tip C4

Etaloni tipa C4 sadrže brazde sa žljebastim profilom. Ovi etaloni su karakterizirani sa PSm (prije spomenuti uzdužni parametar srednjeg koraka profila, u ovom slučaju primarnog) i Pa (srednje aritmetičko odstupanje primarnog profila).



Slika 33. Tip C4

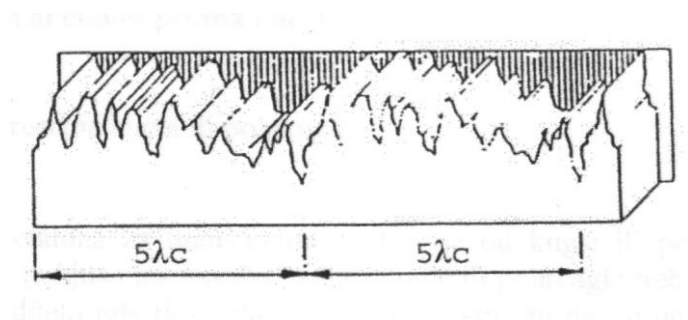
4.4 Tip D — etalon hrapavosti

Etaloni sa nejednolikim brazdama imaju nepravilan profil u smjeru ispitivanja. Oni simuliraju radne uvjete u širokom području odstupanja, ali je točnost umjeravanja uređaja općenito manja nego kod etalona s jednolikim brazdama. Zbog toga se i vrlo rijetko upotrebljavaju. Iako se prema DKD-R u korisničkom sučelju koriste za umjeravanje uređaja s ticalom, iz navedenog razloga, a i zbog toga što su korišteni državni etaloni hrapavosti tipa C, etaloni sa nejednolikim brazdama se neće koristiti kod umjeravanja, već će se umjesto njih koristiti etalon tipa C. U ISO standardu definirane su dvije vrste, tip D1 sa usmjerenim nepravilnim profilom i tip D2 sa kružnim nepravilnim profilom.

Tip D1

Etaloni tipa D1 etaloni su sa usmjerenim nepravilnim profilom. Karakterizirani su sa Ra i Rz . Parametar Rz je najveća visina profila hrapavosti, a predstavlja sumu visine najvećeg vrha profila i najveće dubine dola unutar referentne duljine. Etaloni tipa D1 imaju nepravilni

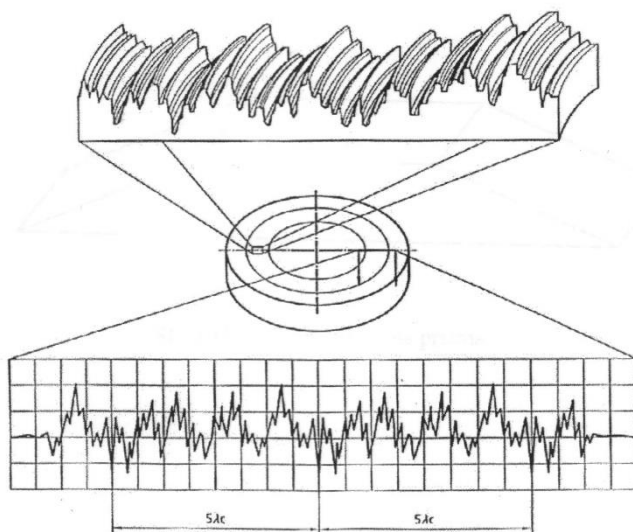
temeljni profil koji se ponavlja svakih $5\lambda_c$, u longitudinalnom smjeru etalona. Okomito na pravac mjerenja etalona, oblik profila je konstantan.



Slika 34. Tip D1

Tip D2

Etaloni tipa D2 su etaloni sa kružnim nepravilnim profilom. Karakterizirani su sa Ra i Rz . Imaju nepravilni temeljni profil koji se ponavlja svakih $5\lambda_c$, u radijalnom pravcu etalona.



Slika 35. Tip D2

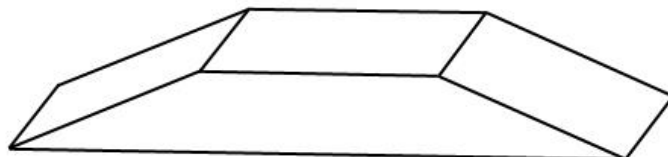
4.5 Tip E — etalon profila koordinata

Tip E1 — Precizna kugla ili polukugla

Ovaj tip etalona za umjeravanje sastoji se od kugle ili polukugle. Oni su karakterizirani sa radijusom r i sa Pt . Parametar Pt predstavlja sumu najvećeg vrha profila i najveće dubine dola unutar duljine vrednovanja ln . Radijus kugle ili polukugle treba biti takav da se dopusti sfernom dijelu igle ticala da ostaje u kontaktu (ali ne i drugom dijelu ticala) tijekom simetričnog prelaska sa jedne strane najviše točke kugle ili polukugle kroz cijeli mjerni raspon unutar duljine ocjenjivanja.

Tip E2 — Precizna prizma

Ovi etaloni za umjeravanje sastoje se od prizme sa trapeznim presjekom. Vrh površine i dvije površine stvorene sa stranama trapeza su mjerne površine. Kutovi dvostranih mjernih površina su konstruirani tako da je vrh ticala u kontaktu sa površinom kroz cijeli mjerni raspon uređaja. Karakterizirani su sa kutovima između površina i sa P_t , na svakoj površini.



Slika 36. Tip E2

5. Proračun stabilnosti državnog etalona za hrapavost Perthen

Nakon 19 godina korištenja odlučeno je da se provede istraživanje mjeriteljskih značajki na etalonu hrapavosti Perthen (Slika 36.), koji se koristi kao jedan od 3 referentna etalona hrapavosti u Republici Hrvatskoj. Analiza se temelji na rezultatima mjerenja parametara hrapavosti (Ra i Rz), danim u certifikatima od strane nekoliko nacionalnih mjeriteljskih instituta.



Slika 37. Referentni državni etalon za hrapavost Perthen

Mjerna površina, omeđena pravokutnikom, kako je prikazano na slici 36., sastoji se od slijeda brazdi trokutaste geometrije i ima dimenzije 10 mm x 5 mm. Etalon je izrađen od stakla što ga čini pogodnim za kontaktnu metodu ispitivanja hrapavosti.

Nazivne vrijednosti parametara Ra i Rz dane su u Tablici 3.

Tablica 3. Nazivne vrijednosti parametara hrapavosti na etalonu Perthen

Etalon	λ_c , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rsm , μm
Perthen	0,8	0,42	1,5	100

5.1 Vizualna kontrola stanja mjerne površine

Ovaj etalon je 19 godina korišten kao nacionalni etalon hrapavosti i redovito je umjeravan u tom periodu. Prva potvrda o umjeravanju datira iz 1997. godine. Da bi se osigurala sljedivost za etalone nižeg reda i uređaje s ticalom, etalon je mjeren više od 400 puta korištenjem kontaktne metode. U svakom mjerenju, najmanje 6 tragova je snimljeno koristeći različita ticala, tj. više od 2400 tragova je snimljeno na mjernoj površini. U cilju vizualne provjere stanja mjerne površine etalon hrapavosti Perthen analiziran je korištenjem svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51. Stanje mjerne površine je vrlo zadovoljavajuće. Na etalonu se ne vide tragovi prolaska igle ticala niti druga mehanička oštećenja. Na Slikama 37. i 38. prikazani su segmenti mjerne površine pod uvećanjem 100x i 200x.



Slika 38. Mjerna površina pod uvećanjem 100x



Slika 39. Mjerna površina pod uvećanjem 200x

5.2 Analiza stabilnosti parametara hrapavosti

Da bi se donio zaključak o stabilnosti mjeriteljskih značajki, istraživanje se temelji na rezultatima mjerenja koji su provedeni od strane nekoliko nacionalnih mjernih instituta i dani u 5 potvrda o umjeravanju, u razdoblju od 1997. do 2011. godine. Parametri hrapavosti (Ra i Rz) su mjereni u skladu sa normom ISO 4287, koja se primjenjivala u to vrijeme. U svim certifikatima zajednički je uvjet: radijus vrha ticala $r = 2 \mu\text{m}$, objavljeni rezultati su dobiveni na 12 profila.

Tablica 4. prikazuje rezultate mjerenja parametara hrapavosti koji su objavljeni u certifikatu, sa proširenom mjernom nesigurnošću izraženom uz faktora pokrivanja $k = 2$, $P = 95\%$.

Tablica 4. Rezultati mjerenja parametara hrapavosti po godinama

Godina	Filter	λ_c , mm	Ra , μm	U	Rz , μm	U
1997.	Gauss-ov	0,8	0,44	4%	1,65	6%
1999.	Gauss-ov	0,8	0,44	4%	1,63	6%
2002.	2RC	0,8	0,441	2%	1,6	3%
2006.	Gauss-ov	0,8	0,44	0,02 μm	1,6	0,08 μm
2011.	Gauss-ov	0,25	0,44	0,02 μm	1,59	0,08 μm

U sklopu metode za usporedbu laboratorija koristi se faktor slaganja En kao mjerilo dosljednosti individualnih rezultata u odnosu na referentnu vrijednost, te Birgeov kriterij R_B kao test cjelokupne statističke dosljednosti podataka. Faktor slaganja En računa se u svrhu ocjene kompatibilnosti rezultata mjerenja koji sudjeluje u usporedbenom mjerenju prema referentnom rezultatu. Računa se prema sljedećem izrazu:

$$E_n = \frac{x_{lab} - x_{ref}}{k \cdot \sqrt{u^2(x_{lab}) - u^2(x_{ref})}}$$

gdje su:

x_{lab} - rezultati mjerenja laboratorija

x_{ref} - referentna vrijednost

$u(x_{lab})$ - mjerna nesigurnost laboratorija

$u(x_{ref})$ - mjerna nesigurnost referentne vrijednosti

k – faktor pokrivanja

Faktor slaganja En treba biti manji od 1 kako bi se rezultat smatrao kompatibilnim, odnosno što je vrijednost bliža 0 to se rezultat smatra kompatibilnim. Ako faktor slaganja ima pozitivan predznak to znači da je rezultat laboratorija veći od izračunate referentne vrijednosti, isto tako ako je negativan predznak to znači da je rezultat laboratorija manji od referentne vrijednosti. Vrijednost En se smatra valjano izračunatom ako je zadovoljen Birgeov kriterij. Ako nije zadovoljen, laboratorij s najvećim faktorom slaganja se izbacuje iz proračuna. To se ponavlja sve dok se ne zadovolji Birgeov kriterij. Birgeov koeficijent se računa po prema izrazu:

$$R_B = \frac{u_{ext}}{u_{int}}$$

gdje su u_{ext} :

$$u_{ext} = \sqrt{\frac{\sum_{l=0}^n \left[\frac{x_l - x_{ref}}{u(x_l)} \right]}{(n-1) \sum_{l=1}^n u^{-2}(x_l)}}$$

u_{int} :

$$u_{int} = \frac{1}{\sum_{l=1}^n u^{-2}(x_l)}$$

Da bi se zadovoljio Birgeov kriterij mora biti manji od sljedećeg izraza:

$$R_B < \sqrt{1 + \sqrt{\frac{8}{n-1}}}$$

Kada se mjerenje isključi iz izračuna referentne vrijednosti i nije u korelaciji s istim En , onda se tom mjerenju En računa prema sljedećem izrazu:

$$E_n = \frac{x_{lab} - x_{ref}}{\sqrt{u^2(x_{lab}) + u^2(x_{ref})}}$$

5.2.1 Rezultati analize s referentnom vrijednosti kao težinskom aritmetičkom sredinom

Težinska aritmetička sredina slična je običnoj aritmetičkoj sredini, samo što kod težinske aritmetičke sredine neki podaci doprinose više u konačnom prosjeku. Kod obične aritmetičke sredine svi podaci jednako pridonose konačnom prosjeku. Računanje referentne vrijednosti preko težinske aritmetičke sredine izvodi se prema izrazima [8]:

$$x_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_i) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_i)}$$

$$u(x_{ref}) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_i)}}$$

gdje su:

x_i - rezultati mjerenja laboratorija

x_{ref} - rezultat referentne vrijednosti

$u(x_i)$ - mjerna nesigurnost laboratorija

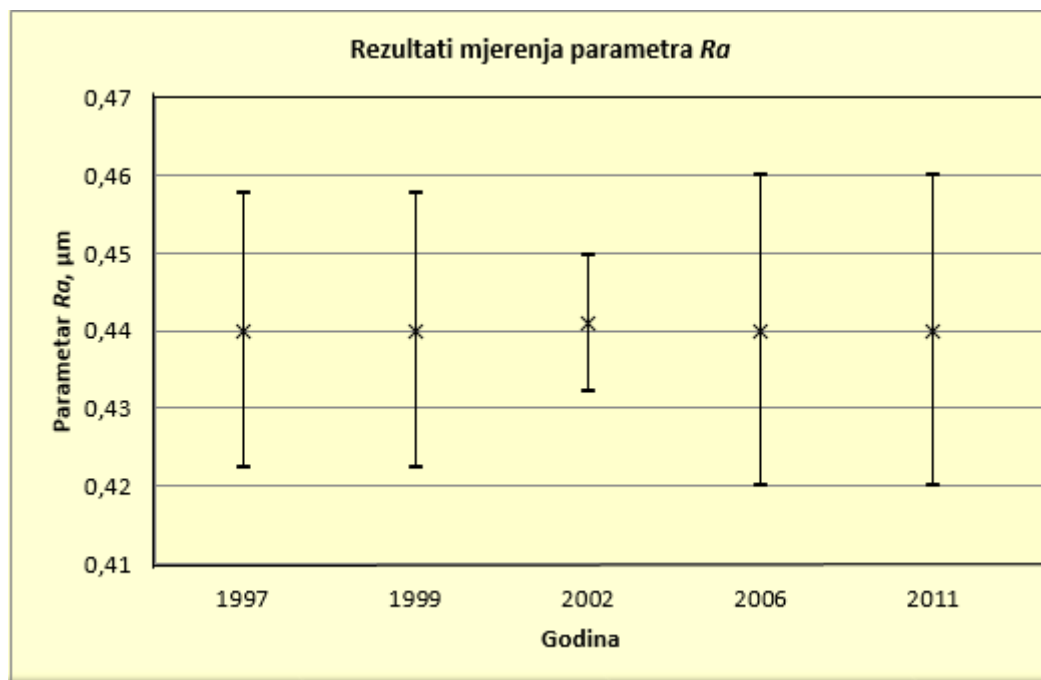
$u(x_{ref})$ – mjerna nesigurnost referentne vrijednosti

Tablica 5. prikazuje rezultate mjerenja parametra hrapavosti Ra po godinama prema podacima iz certifikata o umjeravanju

Tablica 5. Rezultati mjerenja parametra Ra po godinama

Godina	Ra, μm	U $k=2$, $P=95\%$
1997.	0,44	4%
1999.	0,44	4%
2002.	0,441	2%
2006.	0,44	0,02 μm
2011.	0,44	0,02 μm

Na slici 39. prikazana je usporedba rezultata mjerenja parametra Ra po godinama.



Slika 40. Usporedba rezultata mjerenja parametra hrapavosti Ra

U tablici 6. zbirno su prikazani rezultati provedene analize za parametar hrapavosti Ra prema izrazima prethodno navedenim.

Tablica 6. Rezultati proračuna za parametar Ra

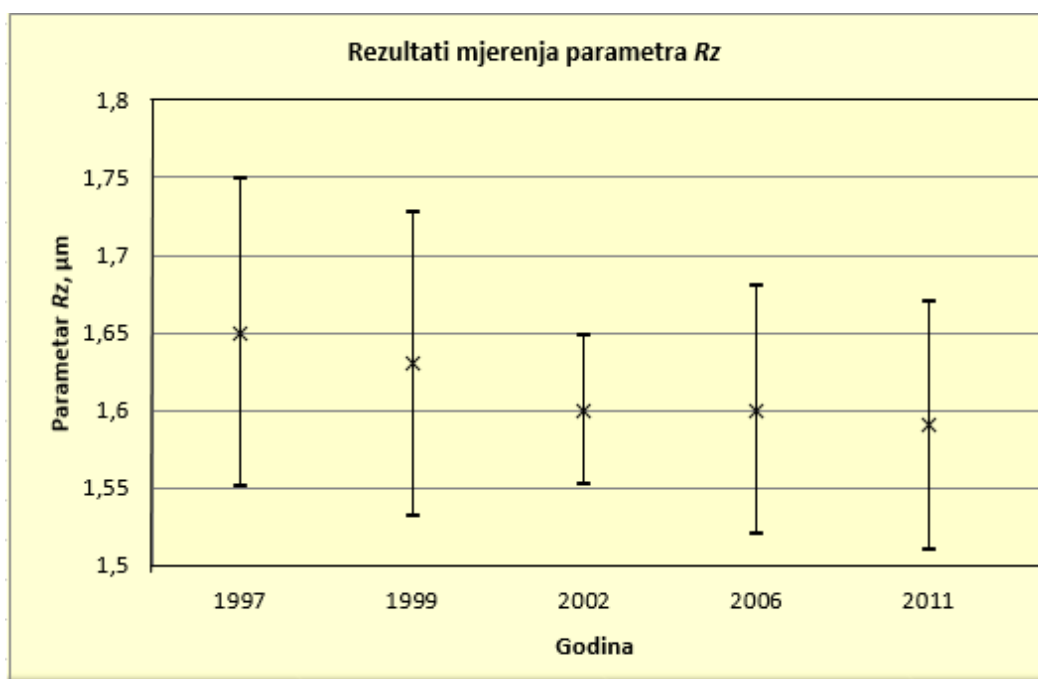
Godina	Ra , μm	u , μm	x_{ref} , μm	$u_{int}(x_{ref})$, μm	$u_{ext}(x_{ref})$, μm	E_n	R_B	$R_{B,krit}$
1997.	0,44	0,0088	0,4405	0,00321	0,00025	-0,0305	0,0779	1,554
1999.	0,44	0,0088				-0,0305		
2002.	0,441	0,0044				0,0826		
2006.	0,44	0,01				0,02639		
2011.	0,44	0,01				-0,02639		

Tablica 7. Prikazuje rezultate mjerenja parametra R_z po godinama.

Tablica 7. Rezultati mjerenja parametra R_z po godinama

Godina	$R_z, \mu\text{m}$	U $k=2,$ $P=95\%$
1997.	1,65	6%
1999.	1,63	6%
2002.	1,6	3%
2006.	1,6	0,08 μm
2011.	1,59	0,08 μm

Na slici 40. prikazana je usporedba rezultata mjerenja parametra R_z po godinama prema podacima iz certifikata o umjeravanju.



Slika 41. Usporedba rezultata mjerenja parametra hrapavosti R_z

U Tablici 8. zbirno su prikazani rezultati provedene analize za parametar hrapavosti R_z prema izrazima prethodno navedenim.

Tablica 8. Rezultati proračuna za parametar R_z

Godina	R_z , μm	u , μm	x_{ref} , μm	$u_{int}(x_{ref})$, μm	$u_{ext}(x_{ref})$, μm	E_n	R_B	$R_{B,krit}$
1997.	1,65	0,0495	1,606	0,0162	0,0091	0,4703	0,564	1,554
1999.	1,63	0,0489				0,26		
2002.	1,6	0,024				-0,169		
2006.	1,6	0,04				-0,082		
2011.	1,59	0,04				-0,2187		

Rezultati umjeravanja ostvareni kroz 19 godina pokazuju dobru statističku konzistentnost unutar granica mjernih nesigurnosti.

Osim srednjih vrijednosti parametara hrapavosti i propisanih mjernih nesigurnosti, instituti također daju podatke o vrijednostima standardnih odstupanja dobivenih na 12 snimljenih profila hrapavosti. Te vrijednosti se također analiziraju jer mogu dati pouzdane informacije o stanju mjerne površine; povećanje iznosa standardnog odstupanja pokazuje da se stanje mjerne površine promijenilo.

Tablica 9. prikazuje standardna odstupanja dana u certifikatima iz 1997., 1999. i 2000. godine.

Tablica 9. Standardna odstupanja za parametre R_a i R_z

Godina	Etalon Perthen	
	$s(R_a)$, %	$s(R_z)$, %
1997.	0,6	2
1999.	0,7	1
2002.	0,3	2

Objavljeni rezultati standardnih odstupanja pokazuju da se u proteklih 19. godina stanje površine nije značajno promijenilo. To posebno pokazuju rezultati parametra R_z koji je vrlo osjetljiv na površinska oštećenja i promjene u geometriji profila.

6. Zaključak

Jedna od tri glavna zadatke mjeriteljstva je osiguravanje sljedivosti. Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti nekog etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedaba koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti. Lanac sljedivosti jest neprekidan slijed umjeravanja, od kojih svaki ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Lanac sljedivosti za parametre hrapavosti Ra i Rz završava osnovnom SI jedinicom duljine-metar.

Za osiguravanje sljedivosti pri ispitivanju hrapavosti u Republici Hrvatskoj zadužen je Nacionalni laboratorij za duljinu. U Republici Hrvatskoj postoje državna 3 etalona hrapavosti koji se umjeravaju u jednom od europskih mjeriteljskih instituta. Sljedivost parametara hrapavosti se potom s državnih etalona, korištenjem uređaja za ispitivanje hrapavosti Perthometer S8P koji je smješten u HMI/FSB-LPMD-u, prenosi na ostale etalone hrapavosti.

HMI/FSB-LPMD je ujedno i HAA akreditiran laboratorij za umjeravanje etalona hrapavosti i uređaja za ispitivanje hrapavosti. Prema definiranom sustavu osiguravanja kvalitete Laboratorij je dužan redovito umjeravati mjernu opremu. Etalon hrapavosti koji je bio predmet ovog Završnog rada prvi je put umjeren 1997. godine. U godinama koje su uslijedile period između dva redovita umjeravanja se mijenjao. Ovim radom željelo se utvrditi može li se vrijeme između dva redovita umjeravanja produžiti na 6 godina. Kako bi se donijela takva odluka bilo je potrebno provesti analizu mjeriteljskih značajki etalona hrapavosti Perthen.

U prvom dijelu provedena je vizualna kontrola stanja mjerne površine korištenjem svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51. Na razini povećanja od 200x nisu uočeni tragovi uslijed prolaza igle ticala niti bilo kakva druga mehanička oštećenja.

Analiza stabilnosti mjeriteljskih značajki etalona hrapavosti Perthen oslanjala se na rezultate mjerenja iz pet certifikata za vremenski od 1997. do 2011. Provedena analiza uključivala je potvrđivanje statističke konzistencije rezultata mjerenja parametara hrapavosti računanjem Birge-ovog kriterija, te faktora slaganja (En) za svaki analiziran parametar hrapavosti. Rezultati analize potvrdili su dobro slaganje rezultata mjerenih parametara hrapavosti unutar iskazanih razinama mjernih nesigurnosti u odnosu na težinsku aritmetičku sredinu.

U tri izdana certifikata navedene su i vrijednosti procijenjenih standardnih odstupanja parametara hrapavosti Ra i Rz ostvarenih na 12 tragova. Iako se radi o kratkom vremenskom

periodu od 5 godina, vidimo da nema značajnih odstupanja u iznosima standardnih odstupanja, te možemo zaključiti kako se ujednačenost mjernih površina nije značajno mijenjala. Da tome nije tako, na procijenjenim standardnim odstupanja za parametar R_z , kod kojeg ako je došlo do narušavanja mjernih površina, odnosno geometrije profila prijetili bi porast iznosa standardnog odstupanja.

Provedena analiza mjeriteljskih značajki etalona hrapavosti Perthen potvrdila je da nakon 19 godina korištenja etalona analizirane značajke ne pokazuju značajna odstupanja i govore u kvaliteti mjerne površine. Iz svega navedenog može se zaključiti da je razumno produjiti period između dva redovita umjeravanja na 6 godina.

7. Literatura

- [1] Baršić G.: Priručnik kvalitete (16. izdanje), Nacionalni laboratorij za duljinu, Zagreb, 2015.
- [2] Runje B.: Teorija i tehnika mjerenja, predavanja, FSB, Zagreb 2015
- [3] Rudan D.: Umjeravanje vertikalne komponente elektroničko – mehaničkog uređaja s ticalom – Diplomski rad, Zagreb 2013.
- [4] Upute za rukovanje Perthen S8P, LFSB R030, 1988.
- [5] ISO 3274:1996: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments, 1996.
- [6] ISO 4287:1997: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters, 1997.
- [7] ISO 5436-1:2000: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Measurement standards, 2000.
- [8] Dobrota S.: Analiza rezultata usporednih mjerenja – Diplomski rad, Zagreb 2012